

Regelungstechnik zwischen Mikro- und Makroelektronik

Leonhard, Werner

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1984 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.65-84



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Regelungstechnik zwischen Mikro- und Makroelektronik

Von **Werner Leonhard**, Braunschweig

Einleitung

Der heutige Tag steht im Zeichen der Halbleitertechnik, die sich als ein autonomer Bereich zwischen den in der Elektrotechnik vorher dominierenden Gebieten der elektrischen Leiter und Isolatoren etabliert hat. Das Besondere an Halbleiter-Bauteilen ist, daß sie elektronisch, d. h. sehr schnell, fast leistungslos und verschleißfrei steuerbar sind, wobei sie ihren elektrischen Widerstand um bis zu 8 Größenordnungen verändern, also wahlweise einen Nichtleiter und einen Leiter darstellen können. Halbleiterbauelemente sind deshalb äußerst vielseitig verwendbar, die Elektronikindustrie gilt inzwischen als die bedeutendste Wachstumsindustrie der 80er Jahre mit Ausstrahlungen in alle Gebiete der Technik. Angesichts der zu überwindenden physikalischen und technologischen Probleme wird der Stand der Halbleiter-Industrie manchmal als repräsentativ für den gesamten technischen Stand eines Industrielandes angesehen. Dies ist sicher eine einseitige Betrachtungsweise, hinter der man auch wirtschaftspsychologische Suggestion vermuten kann, doch hat die Sorge, hier gegenüber Amerika und Japan auf Dauer zurückzufallen, inzwischen auch in den klassischen europäischen Industrieländern zur Entfaltung ungeahnter Energien geführt, mit dem Ziel, den wirklichen und vermeintlichen Rückstand aufzuholen.

Da die Vorträge des heutigen Tages im wesentlichen die physikalischen Grundlagen der Halbleitertechnik betreffen, erschien es sinnvoll, in einem ergänzenden Bericht auch Anwendungen der Halbleitertechnik zu behandeln; die Regelungstechnik ist dafür besonders geeignet, da sie im Schnittpunkt von Mikroelektronik und Leistungselektronik, den beiden Hauptlinien der Halbleitertechnik, steht, so daß sie von deren Entwicklung unmittelbar betroffen ist.

1. Was ist Regelungstechnik?

Aufgabe der Regelungstechnik ist es bekanntlich, technische Abläufe so zu steuern, daß bestimmte Zielgrößen (Regelgrößen) an vorgegebene Sollverläufe (Führungsgrößen) angeglichen werden. Dies ist notwendig, um die Einflüsse von nicht kontrollierbaren Störgrößen, von Belastung und Verschleiß zu beseitigen und Zielkonflikte, die von anderen Regelvorgängen herrühren, auszugleichen. Beispiele für geregelte Vorgänge sind die

- Frequenz- und Spannungshaltung im elektrischen Verbundnetz,
- translatorische Bewegung einer Aufzugskabine,
- räumliche Bewegung eines Flugkörpers oder die Greifbewegung eines Roboters.

Der Zweck einer Regelung ist es also, technische Abläufe definiert und reproduzierbar zu gestalten, eine universelle Aufgabe in der Technik. Sie hat viele Parallelen im nicht-technischen Bereich und in der Natur, da jedes zielgerichtete und der Korrektur unterliegende Handeln sich als Regelvorgang deuten läßt. Andererseits kann der Ausgleich von Störgrößen auch einen Schutz vor gefährlichen Umwelteinflüssen bedeuten, weshalb die in der biologischen Evolution entstandenen Regelmechanismen als eine Voraussetzung für die Entwicklung höheren organischen Lebens zu betrachten sind.

Da der Korrektur eine Messung vorausgehen muß, entsteht – wie Bild 1 zeigt – bei jeder Regelung ein geschlossener Wirkungskreis; jedes Regelsystem birgt deshalb ein Stabilitätsproblem, das durch geeignete Wahl des Reglers gelöst werden muß.

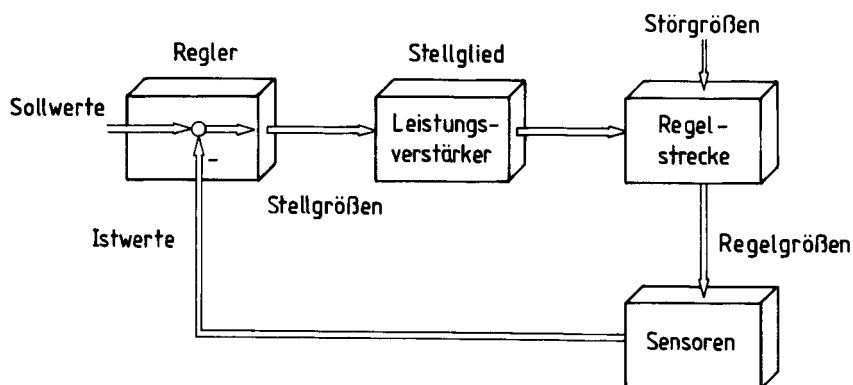


Bild 1:
Prinzip eines Regelkreises

Der Aufbau eines technischen Regelsystems umfaßt mehrere Teilaufgaben:

- Die Messung der interessierenden physikalischen Größen (Kraft, Druck, Durchfluß, Beschleunigung, Geschwindigkeit, Temperatur, pH-Wert usw.) mit Sensoren und ihre Umwandlung in elektronische Signale niedriger Leistung.
- Die Bestimmung des Regelfehlers durch Soll-Ist-Vergleich und die Verarbeitung (Filterung, Prädiktion, Integration usw.) in einem Regler, mit dem Ziel der Erzeugung eines geeigneten Stellsignals, das den Regelfehler beseitigt und gleichzeitig die Stabilität des gesamten Systems sichert.
- Die Verstärkung des Stellsignals und die Steuerung des technischen Prozesses (Regelstrecke).

Bei der Lösung aller Teilaufgaben ist heute die Halbleitertechnik unentbehrlich, wobei die in den Halbleiterelementen umgesetzten, bzw. von Halbleiterbaugruppen gesteuerten elektrischen Leistungen zwischen μW und GW liegen, d. h. 15 Größenordnungen

überspannen. Das für die aktiven Elemente heute vorzugsweise verwendete Halbleitermaterial ist Silizium, das als Rohstoff in beliebigen Mengen zur Verfügung steht und wegen der verbreiteten Infrastruktur in der Verarbeitung keine Monopolsituation befürchten läßt. Bei der Entwicklung und Erzeugung des für elektronische Halbleiterelemente benötigten hochreinen Siliziums hat übrigens unsere Industrie eine bedeutende Stellung; wichtige Verfahren stammen aus ihrer Forschung und beträchtliche Anteile, z. B. auch des in der amerikanischen Halbleiterindustrie verwendeten Siliziums, aus ihrer Produktion.

2. Messung und Signalverarbeitung

2.1. Analoge Verfahren

Für viele physikalische Größen, seien sie elektrischer, mechanischer, magnetischer oder thermischer Natur, gibt es heute Sensoren auf Halbleiterbasis mit elektronischem Ausgangssignal. Sie zeichnen sich durch hohe Empfindlichkeit und kleine Abmessungen aus, da alle aktiven Teile, die elektrischen Verbindungen und die erforderliche Verarbeitungselektronik im Halbleiterkristall integriert sein können. Das elektrische Nutzsignal kann im Prinzip beliebig klein sein, da die Signalverstärkung mit Halbleitern keine unüberwindbaren Schwierigkeiten mehr bedeutet; wesentlich ist nur ein hinreichend großes Verhältnis von Nutz- und Störsignal.

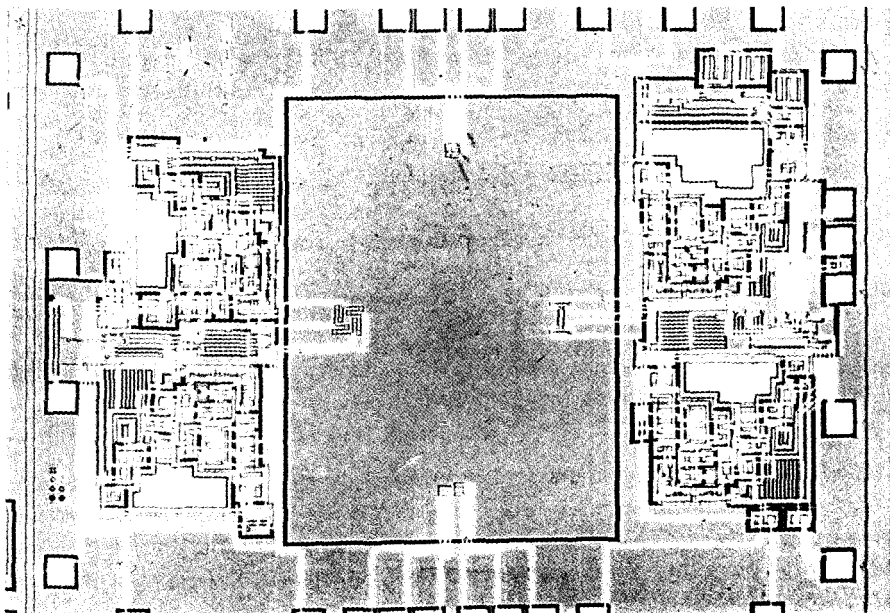


Bild 2:
Mikroaufnahme eines integrierten Drucksensors (Toyota)

Als Beispiel ist in Bild 2 die Mikroaufnahme eines integrierten Sensors gezeigt, der zur Druckmessung im Ansaugkanal von Verbrennungsmotoren dient. Die druckabhängige Deformation des Mittelstückes wird dabei durch piezoresistive Dehnungselemente an den vier Kanten in ein elektrisches Signal umgesetzt, das mit den in den Außenbereichen angeordneten Kompensations- und Verstärkerschaltungen aufbereitet wird. Der Meßbereich des 1×3 mm großen Halbleitersensors liegt zwischen Null und 750 mm Hg; die Empfindlichkeit von 4 mV/mm Hg wird dabei in einem Temperaturbereich von -20°C bis 110°C mit geringen Abweichungen konstant gehalten. Die den Einbau erleichternden kleinen Abmessungen und die durch eine automatisierte Fertigung erreichbaren niedrigen Produktionskosten sind wichtige Aspekte, für die es bei Sensoren aus diskreten Bauelementen keine Parallelen gab.

Die meisten Sensoren arbeiten „analog“, indem sie die zu messende Größe $x(t)$ über einen stetigen physikalischen Zusammenhang $u = f(x)$ in ein elektrisches Signal $u(t)$ abbilden. Falls die Kennlinie $f(x)$ nicht ausreichend linear ist, kann sie in einem nachgeschalteten Korrekturglied mit der Umkehrfunktion linearisiert werden. Wegen der unvermeidlichen Störeinflüsse und Parameteränderungen, z. B. durch Alterung oder Temperatureffekte, sind meist Abgleichschaltungen notwendig, wie dies am Beispiel des Drucksensors gezeigt wurde. Auch für einen selbsttätigen Abgleich gibt es heute schon brauchbare elektronische Lösungen.

Die wichtigsten Hilfsmittel der Signalaufbereitung sind elektronische Schaltungen unter Verwendung von Transistor-Verstärkern hoher Verstärkung und Übertragungsbandbreite (Frequenzbereich von Null bis MHz). Solche universell verwendbaren Bauelemente sind heute als miniaturisierte und im Halbleiterkristall eingebettete „integrierte Rechenverstärker“ für wenige DM erhältlich. Bild 3 zeigt einen solchen „Verstärker-Chip“ in Verbindung mit externen elektrischen Schaltelementen; diese bestimm-

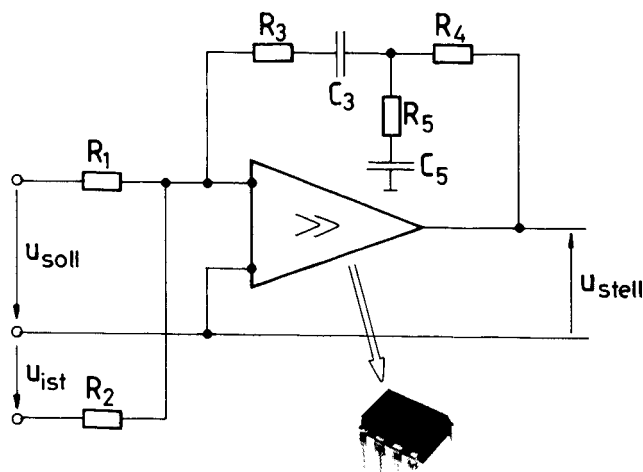


Bild 3:
Integrierter Rechenverstärker

men das Gesamtübertragungsverhalten in Form einer „analogen“ Differentialgleichung, wobei die Eingangsgröße als Anregungsfunktion, die Ausgangsgröße als Lösungsfunktion wirkt. Während des Betriebs wird diese Gleichung „in Echtzeit“, d. h. schritthaltend mit dem technischen Prozeß, gelöst. Außer den linearen Verstärkern gibt es, allerdings meist zu höheren Kosten, viele andere integrierte Analogschaltungen, etwa Multiplizierer, Modulatoren, Komparatoren oder Kennlinienbildner. Sobald bestimmte Funktionen mit speziellen Anforderungen und definierbaren Randbedingungen in größerer Stückzahl benötigt werden, geht die Halbleiterindustrie unverzüglich daran, entsprechende Standardbausteine zu entwickeln und auf dem zunehmend breiter werdenden Markt anzubieten. Meistens besteht dann nach kurzer Zeit die Möglichkeit, konkurrierende oder in Lizenz gebaute Komponenten von anderen Firmen zu beziehen, was bei größeren Vorhaben einen wichtigen Sicherheitsaspekt darstellt.

Zusätzlich zu diesen sog. Standardbausteinen bietet die Halbleiterindustrie heute auch Verfahren an, um für Kunden spezielle, d. h. individuell entwickelte, Bausteine zu fertigen. Dies kann bereits bei wenigen tausend Exemplaren interessant werden; bei Großserien, etwa für Anwendungen in der Nachrichtentechnik oder im Automobilbau, werden solche kundenspezifische Schaltungen fast immer die wirtschaftlichste Lösung darstellen. Außerdem schützen sie, wenigstens für begrenzte Zeit, vor unerlaubtem Nachbau.

2.2. Digitale Signalverarbeitung

Die Möglichkeiten der Signalverarbeitung lassen sich durch den Übergang zu digitalen Verfahren wesentlich erweitern, denn

- binäre Signale, aus denen digitale Signale aufgebaut sind, haben ein wesentlich größeres Nutz-Stör-Verhältnis als analoge Signale, so daß Nullpunktsfehler und Störsignale an Bedeutung verlieren.
- mit einer ausreichenden Wortlänge und einem geeigneten Algorithmus besteht nicht mehr die Gefahr einer unkontrollierten Fehlerfortpflanzung wie bei analogen Verfahren, so daß sich die Möglichkeit einer praktisch beliebig komplexen numerischen Signalverarbeitung eröffnet.
- für die physikalischen Grundgrößen Zeit und Länge bzw. Winkel gibt es sehr genaue und digital leicht übertragbare Referenzgrößen. So ist z. B. eine hochgenaue Quarzfrequenz ($\Delta f < 10^{-6} f_0$) auf Halbleiterbausteinen kostengünstig verfügbar (10^{-6} entspricht einem Fehler von weniger als 1 s in 10 Tagen); mit erhöhtem Aufwand läßt sich diese Genauigkeit noch wesentlich steigern.

Für die Signalwandlung Analog/Digital und Digital/Analog sind an den Schnittstellen Umsetzer erforderlich, die Verstärker und Logikschaltungen enthalten und ebenfalls als integrierte Halbleiterbausteine für die unterschiedlichsten Spezifikationen erhältlich sind. Analog/Digitalwandler arbeiten häufig nach dem Prinzip der schrittweisen Approximation, indem sie den analogen Meßwert von beiden Seiten eingrenzen. Umwandlungszeiten von wenigen Mikrosekunden und Auflösungen bis zu 16 bit, d. h. ± 32.000 Stufen, gehören zum Stand der Technik; allerdings nehmen die Kosten mit der

Wortlänge und der Geschwindigkeit stark zu. Während man in der Anfangszeit der Digitaltechnik verschiedene leicht lesbare dezimal/binäre Codes bevorzugte, hat sich heute der Dualcode für die rechnerinterne Verarbeitung allgemein durchgesetzt. Lediglich bei der Ein- und Ausgabe, d. h. an der Mensch-Maschine-Schnittstelle, werden andere und leichter interpretierbare Codes verwendet.

Bei einer digitalen Signalverarbeitung treten an die Stelle der Differentialgleichungen für analoge Signale Differenzgleichungen zur Verarbeitung der diskreten Wertefolgen, wobei die gleiche Vielfalt an Funktionen zur Verfügung steht. Sofern die Taktfrequenz genügend hoch ist, werden die durch die Diskretisierung der Signale entstehenden Unstetigkeiten von der verzögerungsbehafteten Regelstrecke interpoliert, so daß die Ausgangsgröße praktisch stetig verläuft. Damit ist von außen nicht mehr erkennbar, daß ein Teil der Verarbeitungskette nicht kontinuierlich sondern amplitudenmäßig und zeitlich diskret arbeitet.

3. Signalverarbeitung in der Regeltechnik

3.1. Analog oder digital?

Die digitale Signalverarbeitung wurde bei Regelungen vor etwa 25 Jahren erstmals verwendet; Anlaß waren die damit erreichbare Genauigkeit und Reproduzierbarkeit. Um z. B. den Vorschub an einer Werkzeugmaschine mit einem Verstellhub von 1 m auf 10 µm genau regeln zu können, ist eine Messung des Lagefehlers mit einer Toleranz von weniger als 10^{-5} erforderlich. Bei einem digitalen Soll-Ist-Vergleich bietet dies keine Schwierigkeiten, sofern der Istwert genau genug erfaßt werden kann, während bei einem analogen Verfahren der Abgleich durch Drifteffekte und Störsignale verfälscht würde. Ein weiterer Gesichtspunkt, der für digitale Regelverfahren sprach, war die Möglichkeit der Speicherung von Sollwertprogrammen bei Werkzeugmaschinen und die Istwertverarbeitung zur Prozeßanalyse und Optimierung z. B. in der Verfahrenstechnik. Ein breiter Einsatz digitaler Regelverfahren war allerdings nicht praktikabel, da digitale Verfahren mit einem großen gerätetechnischen Aufwand belastet waren; die Anwendung blieb deshalb auf wenige Fälle, z. B. teure Werkzeugmaschinen, Richtantennen oder Papiermaschinenantriebe beschränkt.

Sobald mit diskreten Halbleiterkomponenten leistungsfähige und zuverlässige Prozeßrechner, d. h. Digitalrechner mit Einrichtungen für Echtzeitsignalverarbeitung, hergestellt werden konnten, versuchte man, größere Automatisierungsaufgaben mit einer zentralen Rechnerstruktur, wie sie in Bild 4 a gezeigt ist, zu lösen.

Der Prozeßrechner hat dabei die Aufgabe, eine größere Zahl von Regelaufgaben (50 oder 100) zeitlich ineinander verschachtelt zu bearbeiten. Nur so schien es möglich, den großen Aufwand für den Rechner wirtschaftlich zu rechtfertigen. Allerdings weist eine solche zentrale Struktur – wie aus Wirtschaft und Politik bekannt – gravierende Nachteile auf, die zunächst unterschätzt wurden:

- Alle, auch die zeitkritischen Signale, müssen den zentralen Rechner passieren, so daß ein Informations-Engpaß entsteht, der bei einer Störung im Kern des Rechners

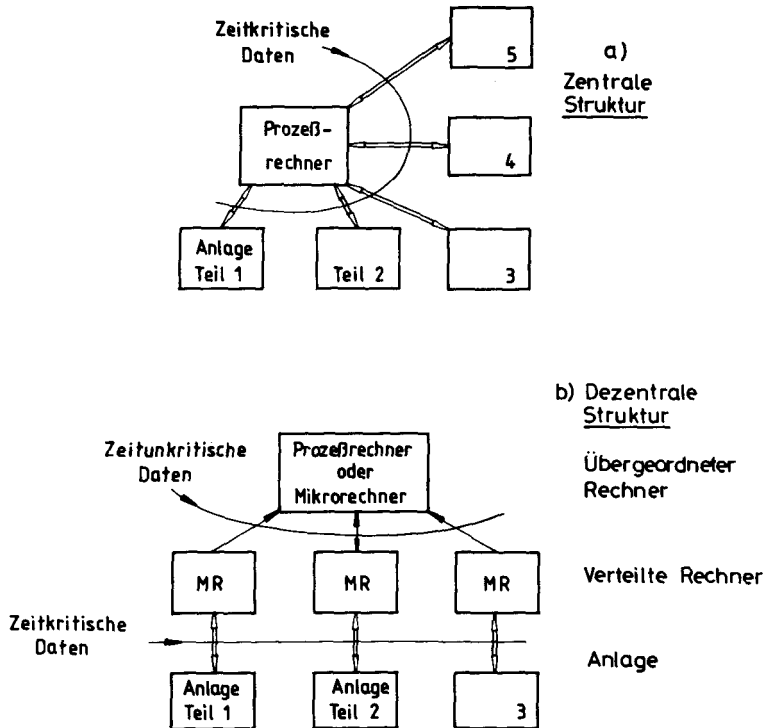


Bild 4:

Zentrale und dezentrale Struktur einer rechnergesteuerten Automatisierung

zu einem Gesamtausfall des Systems, z. B. einer verfahrenstechnischen Großanlage, führen kann. Zeitweilige Übernahme der Regelfunktionen durch das – angesichts der angestrebten Automatisierung reduzierte – Bedienungspersonal ist dann nicht möglich. Da eine solche Störung im Rechner, selbst bei einer Verfügbarkeitsgarantie von 99,5%, nie auszuschließen ist, bleibt nur die Einführung von Redundanz, d. h. die Bereitstellung eines verteilten analogen Regelsystems, auf das im Bedarfsfall umgeschaltet werden kann oder eines zweiten Rechners, der sich im Normalbetrieb passiv verhält (wobei er seine Ergebnisse mit denen des aktiven Rechners vergleicht) und im Störfall die Regelung übernimmt. Wegen der Schwierigkeit, schnell festzustellen, bei welchem Rechner im Falle einer Abweichung ein Defekt vorliegt, kann es notwendig sein, noch einen dritten Rechner aufzustellen, um Mehrheitsentscheidungen zu treffen. Solche aufwendigen Lösungen mindern natürlich die Attraktivität einer zentralen digitalen Regelung erheblich, dennoch sind solche Mehrrechnerstrukturen für Anlagen mit hohen Sicherheitsanforderungen, z. B. Eisenbahnstellwerke oder Kraftwerke, ausgeführt worden; die Kosten sind aber natürlich sehr hoch.

- Eine zweite Problematik der in Bild 4a gezeichneten zentralen Struktur liegt in der Programmierung des Prozeßrechners. Da die Prioritäten der einzelnen Teilprogramme, charakterisiert durch den Zeitmaßstab der jeweiligen Teilregelstrecke und die erforderliche Abtastfrequenz, verschieden sind, muß es möglich sein, ein laufendes Teilprogramm durch ein anderes mit höherer Priorität zu unterbrechen. Die vorhandenen Zwischenergebnisse sind dabei abzuspeichern, um das unterbrochene Teilprogramm nach Erledigung der dringlicheren Aufgabe ordnungsgemäß weiterführen zu können. Bei einer größeren Anlage bestehen mehrere Prioritätsebenen, so daß solche Unterbrechungsanforderungen ineinander verschachtelt auftreten können. Dies führt auf eine verwickelte Programmstruktur und einen äußerst unübersichtlichen Programmablauf. Da schließlich oft in einer rechnerspezifischen Sprache (Assembler) programmiert werden mußte, um Rechenzeit zu sparen, entstanden in der Praxis schwer wartbare Programme, was wiederum die Kostenseite belastete.

Diese Schwierigkeiten haben dazu geführt, daß digitale Regelverfahren mit zentralen Prozeßrechnern nicht die erwartete Bedeutung für die industrielle Automatisierung angenommen haben. Erst mit kompakten und leistungsfähigen Mikrorechnern, wie die Halbleitertechnik sie heute zur Verfügung stellt, lassen sich umfangreiche regelungstechnische Aufgaben wirtschaftlich lösen. Mit einer dezentralen Struktur gemäß Bild 4b ist dafür zu sorgen, daß zeitkritische Signale unmittelbar und ohne die Notwendigkeit der Koordination mit anderen Anlageteilen verarbeitet werden können. Ein zentraler Rechner kann für übergeordnete Aufgaben, z. B. Optimierung, weiterhin vorhanden sein, doch muß es sich um eine lose Kopplung mit zeitunkritischen Signalen handeln. Mit einer solchen Systemstruktur sind sowohl die Probleme der begrenzten Verfügbarkeit wie auch der komplexen Programmierung in überzeugender Weise lösbar.

Auch die Frage „Analog oder Digital“ verliert durch die Mikroelektronik an Gewicht; da der gerätetechnische Aufwand sich nicht mehr wesentlich unterscheidet, reduziert sich die Entscheidung auf eine Frage der Zweckmäßigkeit. Dabei wird es sich künftig manchmal zeigen, daß eine digitale Lösung zwar aus Genauigkeitsgründen nicht notwendig wäre, daß sie aber auf längere Sicht sogar den Vorteil geringerer Kosten verspricht.

3.2. Beispiele für Echtzeit-Signalverarbeitung

Anhand zweier Beispiele soll die Komplexität der heute in der Regeltechnik für eine wirtschaftliche Lösung anstehenden Probleme bei der Echtzeit-Signalverarbeitung angedeutet werden.

Bild 5 zeigt einen sechssachsigen Gelenkroboter, wie er von der Automobilindustrie für die eigene Produktion gebaut wird. Die drei Hauptachsen sind in schematischer Form in Bild 6 skizziert. Die Regelungsaufgabe kann darin bestehen, das „Handgelenk“ auf einer vorgegebenen räumlichen Bahnkurve

$$\dot{\mathbf{x}}_{\text{soll}}(t) = [\dot{x}_{1\text{soll}}(t), \dot{x}_{2\text{soll}}(t), \dot{x}_{3\text{soll}}(t)]_T^T,$$

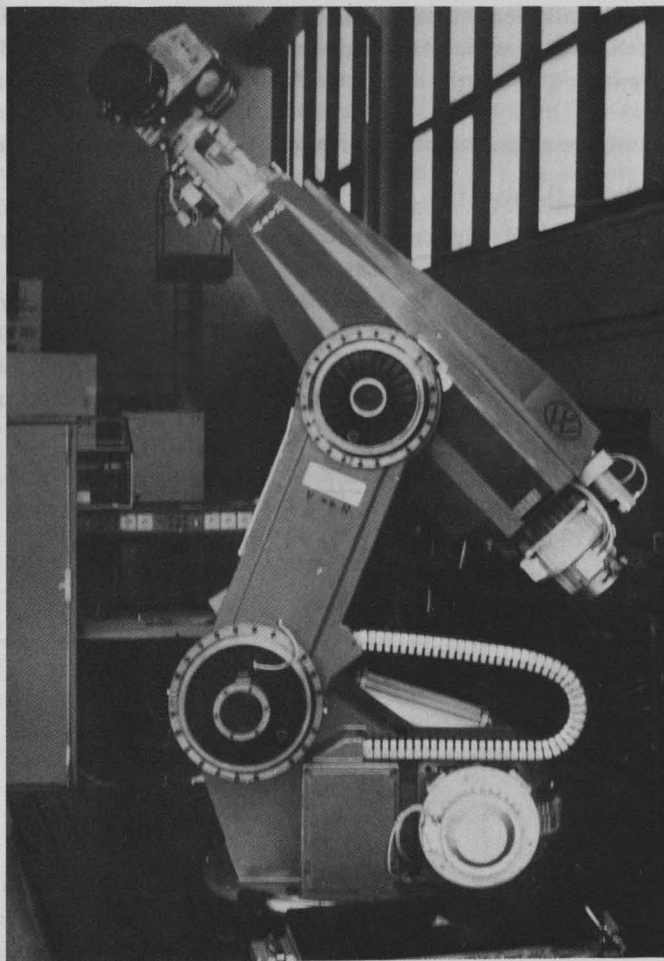
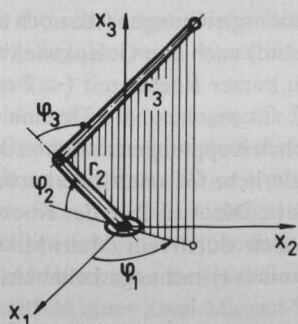


Bild 5:
Roboter mit sechs Bewegungsachsen (VW)



$$x_1 = - \left[r_2 \cos \varphi_2 + r_3 \cos (\varphi_2 + \varphi_3) \right] \cos \varphi_1$$

$$x_2 = - \left[r_2 \cos \varphi_2 + r_3 \cos (\varphi_2 + \varphi_3) \right] \sin \varphi_1$$

$$x_3 = r_2 \sin \varphi_2 + r_3 \sin (\varphi_2 + \varphi_3)$$

Bild 6:
Hauptachsen eines Gelenkroboters

im räumlichen Koordinatensystem zu führen. Die Energiezufuhr erfolgt dabei durch elektrische Stellantriebe an den Hauptachsen, die mit Regelungen für die Gelenkwinkel $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$ ausgerüstet sind; die Raumkoordinaten selbst sind meist nicht meßbar.

Somit ist die Aufgabe zu lösen, zeitlich veränderliche Sollwerte für die Gelenkwinkel,

$$\varphi_{1\text{soll}}(t), \varphi_{2\text{soll}}(t), \varphi_{3\text{soll}}(t)$$

so zu erzeugen, daß das Handgelenk des Roboters gerade die gewünschte räumliche Sollbahn $\underline{x}_{\text{soll}}(t)$ ausführt.

Ein mögliches Regelschema ist in Bild 7 skizziert; es enthält eine inverse Koordinatentransformation \underline{K}^{-1} von den Raum- in die Gelenk-Sollkoordinaten. Diese Rechnung ist in schneller Folge, d. h. mit einer Frequenz von einigen 100 Hz, auszuführen, um eine genaue und von ruckartigen Beschleunigungen freie Bahnkurve zu erzeugen.

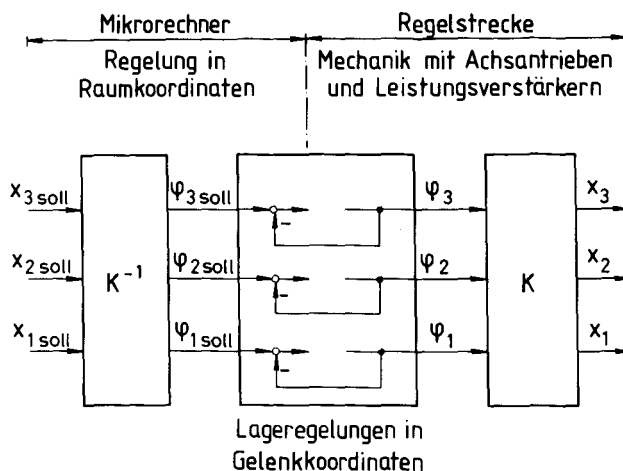


Bild 7:

Koordinatentransformation bei der Bahnführung eines Roboters

Die Auflösung der in Bild 6 enthaltenen Transformationsgleichungen (die noch um drei Drehbewegungen des Handgelenkes zu ergänzen sind) nach den Gelenkwinkeln erfordert erheblichen numerischen Aufwand, da neben kurzer Rechenzeit ($< 2\text{ ms}$) auch eine beachtliche Genauigkeit mit 16 bit Auflösung, entsprechend 4–5 Dezimalen verlangt wird. Bei der Regelung selbst sind die dynamischen Kopplungen zwischen den Achsen (Zentrifugal-, Coriolis-Kräfte) sowie die veränderliche Geometrie zu berücksichtigen, die sich in variablen Trägheitsmomenten äußert. Die Aufgaben der Koordinaten-Transformation und Gelenkwinkel-Regelung sollen durch ein Multi-Mikrorechner-System bearbeitet werden, das sich im Rahmen eines Forschungsvorhabens in Entwicklung befindet.

Als weiteres Beispiel einer anspruchsvollen Echtzeit-Signalverarbeitung sei die adaptive Regelung erwähnt. Das Problem tritt bei Regelstrecken auf, deren Übertragungsverhalten sich arbeitspunktmäßig so stark verändert, daß ein fest eingestellter Regler zu unbefriedigenden Ergebnissen führt. In solchen Fällen kann man versuchen, aus den meßbaren Signalen, z. B. der Eingangs- und Ausgangsgröße der Regelstrecke, deren im Augenblick gültiges Übertragungsverhalten zu rekonstruieren, um daraus Hinweise für die Nachstellung des Reglers abzuleiten. Das Prinzip einer adaptiven Regelung ist in Bild 8 illustriert.

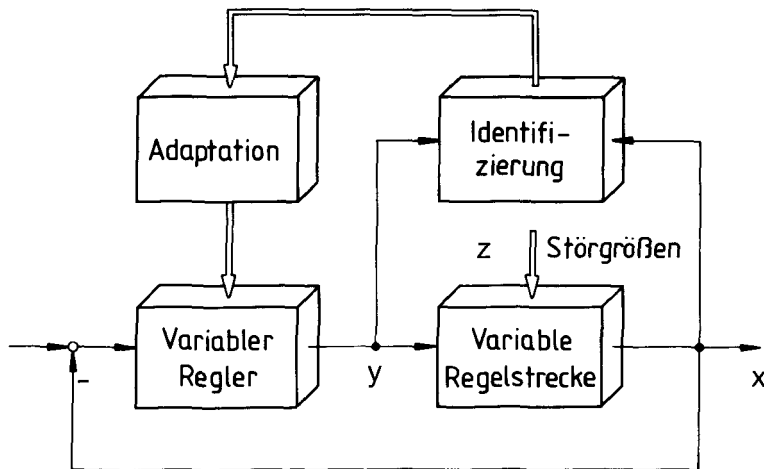
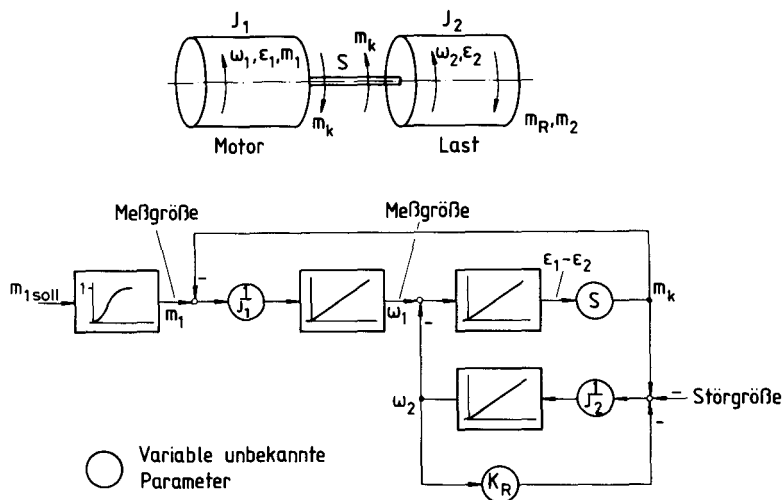


Bild 8:
Prinzip einer adaptiven Regelung

Das Hauptproblem besteht hierbei darin, aus dem gemessenen Verlauf $x(t)$ die Wirkung der nicht meßbaren und daher unbekannten Störgrößen $z(t)$ zu eliminieren. Für diese sog. Identifizierungsaufgabe werden statistische Schätzverfahren herangezogen, z. B. mehrdimensionale Regressionsverfahren, mit denen sich durch umfangreiche und mit unsicheren Annahmen belastete Rechnungen die unbekannten Parameter der Regelstrecken-Differenzgleichung ermitteln lassen. Auch hier ist eine kurze Rechenzeit die schwierigste Nebenbedingung; die Ergebnisse der Identifikation sind ja nur dann von Interesse, wenn sie rechtzeitig verfügbar sind, um die Regelung zu verbessern.

Adaptive Regelungen sind seit langem Gegenstand theoretischer Forschungen, doch war der gerätetechnische Aufwand für die nur digital ausführbaren Berechnungen bisher zu groß, auch hier ergibt sich durch die Entwicklung der Mikroelektronik eine neue Situation. Ein wichtiges Anwendungsgebiet werden Roboter sein, deren Eigenschaften sich geometriebedingt ändern.

Als konkretes Beispiel einer veränderlichen Regelstrecke zeigt Bild 9 das Blockschaltbild eines Zwei-Massen-Systems mit elastischer Welle, das durch eine Differen-



*Bild 9:
Zwei-Massen-System*

tialgleichung dritter Ordnung beschrieben wird. Das Identifikationsproblem kann sich hier so darstellen, daß aus den meßbaren Verläufen des Antriebsdrehmomentes $m_1(t)$ und der Motordrehzahl $\omega_1(t)$ die unbekannten Parameter:

J_1, J_2 Motor- und Lastträgheitsmomente

S Steifigkeit der Welle

K_R Reibungskoeffizient der Last

zu bestimmen sind; das externe Last-Drehmoment m_2 ist im allgemeinen nicht meßbar.

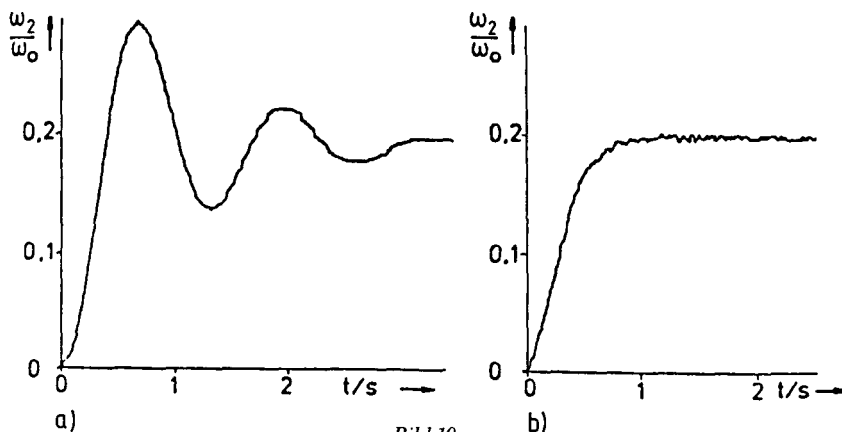


Bild 10: *Regelvorgang mit festeingestelltem und adaptiven Regler*

Das Ergebnis einer adaptiven Regelung ist in Bild 10 gezeigt. Dabei wurde zunächst ein Regler für eine vorgegebene Regelstrecke so berechnet, daß eine sprungförmige Änderung der Führungsgröße (in diesem Fall der Solldrehzahl) ein gut gedämpftes Einschwingverhalten des geschlossenen Regelkreises zur Folge hatte. Anschließend wurde ein Regelstreckenparameter um den Faktor 5 verstellt, so daß der Regler grob fehlangepaßt war; die Folge war der in Bild 10a gezeigte unbefriedigende Einschwingvorgang. Dagegen war es mit einem adaptiven Regler möglich, das veränderte Streckenverhalten schnell genug zu erkennen, um den Regler rechtzeitig nachzuführen und den Einschwingvorgang in Bild 10b günstig zu beeinflussen. Die Adaptation eines Reglers aufgrund einer Identifikation des Streckenverhaltens läßt sich als Lernvorgang deuten, wie er auch bei manuellen Regelungen oder in der Natur vorkommt.

4. Mikroelektronik

4.1. Mikrorechner

Der 1948 erfundene Transistor war nach heutigen Maßstäben ein noch unvollkommenes und großes Halbleiterbauelement aus einem Germaniumkristall, mit dem es möglich war, den Stromfluß zwischen zwei Elektroden mit einem kleinen Hilfsstrom in einer dritten Elektrode zu steuern. Dieses Verstärker-Bauelement wurde in der Folgezeit in vielfältiger Weise, z. B. mit anderen Halbleitern und anderen Funktionsprinzipien, verbessert, so daß heutige Transistoren mit dem damaligen Prototyp hinsichtlich Verstärkung, Grenzfrequenz, Verlustleistung, Temperaturbereich, Abmessungen und Kosten kaum mehr vergleichbar sind. Insbesondere entstand im sog. Feldeffekt-Transistor auch eine Variante, bei der an die Stelle des Steuerstroms das Potential einer hochohmigen Steuerelektrode tritt, ähnlich der frühen Vakuum-Elektronenröhre, aber ohne deren Nachteile.

Da eine Miniaturisierung, wie sie für die Raumfahrt notwendig war, eine kleine Verlustleistung erfordert, bietet die digitale Signaldarstellung wieder besondere Vorteile; der Transistor wird dabei als Schalter betrieben, so daß entweder die Spannung oder der Strom sehr klein ist. Dadurch bot sich zum einen die Möglichkeit, zahlreiche Transistoren dicht gepackt auf einem Halbleiterkristall zu „integrieren“ und sie halbleiterintern durch metallische Leitungen zu verbinden; dies führte zu den integrierten Schaltungen, die heute als logische Funktionsbausteine, Rechenwerke (Mikroprozessoren) und Mikropeicher in einer kaum überschaubaren Vielfalt angeboten werden und ganze Bereiche der Technik revolutionieren.

In einer zweiten Entwicklungslinie war es durch Anwendung des Schaltprinzips und Vergrößerung der Halbleiterfläche möglich, die von einem einzelnen Transistor steuerbare elektrische Leistung immer weiter zu steigern, so daß heute Leistungstransistoren mit einer Ausgangsleistung von vielen kW zur Verfügung stehen. Dieser Aspekt der Halbleitertechnik wird anschließend betrachtet.

Die durch Miniaturisierung der Transistorschalter mögliche massenweise Integration in einem einzelnen Halbleiterkristall und durch automatisierte Herstellungsver-

fahren erreichte Packungsdichte überschreitet inzwischen jedes anschauliche Vorstellungsvermögen; bei Halbleiterspeichern mit ihren regelmäßigen geometrischen Mustern ist dies besonders ausgeprägt. Hier ist man bei 256 k bit-Chips, d. h. $2^{18} \approx 256.000$ binären Speicherzellen auf einem 5×5 mm großen Si-Plättchen angelangt, für $2^{20} \approx 10^6$ bit-Chips (Megabit) werden bereits Produktionsanlagen gebaut und mit $2^{22} \approx 4 \cdot 10^6$ bit-Chips wird experimentiert. Diese Steigerung der Speicherkapazität durch Verkleinerung der elementaren Abmessungen von Leiterbahnen etc. auf $2 \mu\text{m}$ und künftig auf unter $1 \mu\text{m}$ geht einher mit einer dramatischen Senkung der Speicherkosten je bit. In Forschungslaboratorien wird heute schon an Mikroschaltungen mit 20 nm-Strukturen, d. h. weit unterhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes, gearbeitet. Dabei liegt natürlich die Assoziation zur Biologie nahe. Es sei hier nur erwähnt, daß die Periode der die Erbinformation tragenden Doppelspirale bei bestimmten Viren etwa 2 nm beträgt. Ein bedeutender Unterschied ist aber natürlich, daß biologische Strukturen räumlich, die von Mikroschaltungen dagegen flächenhaft angeordnet sind, so daß die Vielfalt der Biologie auch heute noch unerreichbar erscheint.

Die Erhöhung der Leistungsfähigkeit eines Bausteins durch Miniaturisierung und Vergrößerung der Packungsdichte der Einzelelemente ist natürlich nicht auf Mikro-speicher beschränkt, sondern erfaßt alle integrierten Schaltungen. Bild 11 zeigt als Beispiel die mikroskopische Aufnahme einer solchen Schaltung.

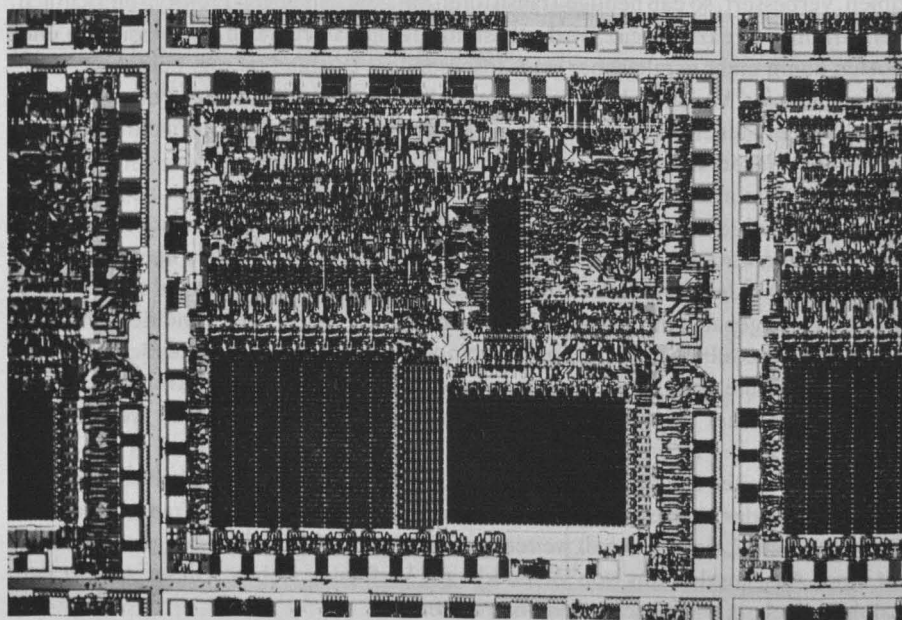


Bild 11:
Schaltung eines Mikroprozessors (Siemens)

Mit solchen Bausteinen lassen sich auf kleinstem Raum und mit geringen Kosten vollständige Rechner aufbauen, die bei entsprechender Verarbeitungsleistung noch vor wenigen Jahren ganze Elektronikschränke gefüllt hätten. Bild 12 zeigt einen Einkarten-Rechner unter Verwendung eines Mikroprozessors 80186 mit folgenden Daten:

Zahlenbereich	16 bit $\approx \pm 32.000$
Speicher	2^{17} bit $\approx 8k$ Worte à 16 bit
Addition	0,6 μ s
Multiplikation	4 μ s

Die Materialkosten eines solchen Rechners liegen unter DM 1000,-; bei spezieller Anwendungsoptimierung und großen Stückzahlen, z. B. im Automobilbau, können die Kosten um bis zu zwei Größenordnungen niedriger sein.

Wenn die damit erzielbare Rechenleistung nicht ausreicht, was bei der Verarbeitung schnell veränderlicher Signale leicht vorkommen kann, besteht die Möglichkeit, diesen Mikrorechner durch einen sog. Signalprozessor mit interner Parallelverarbeitung zu ergänzen. Signalprozessoren wurden ursprünglich für Anwendungen in der Nachrichtentechnik, z. B. bei der Sprachsignal-Verarbeitung, entwickelt, sie haben aber auch in anderen Bereichen, wie in der Regelungstechnik, Verwendung gefunden. Die in Bild 13 gezeigte Rechnerkarte mit einem Signalprozessor TMS 320 kann eine 16×16 bit

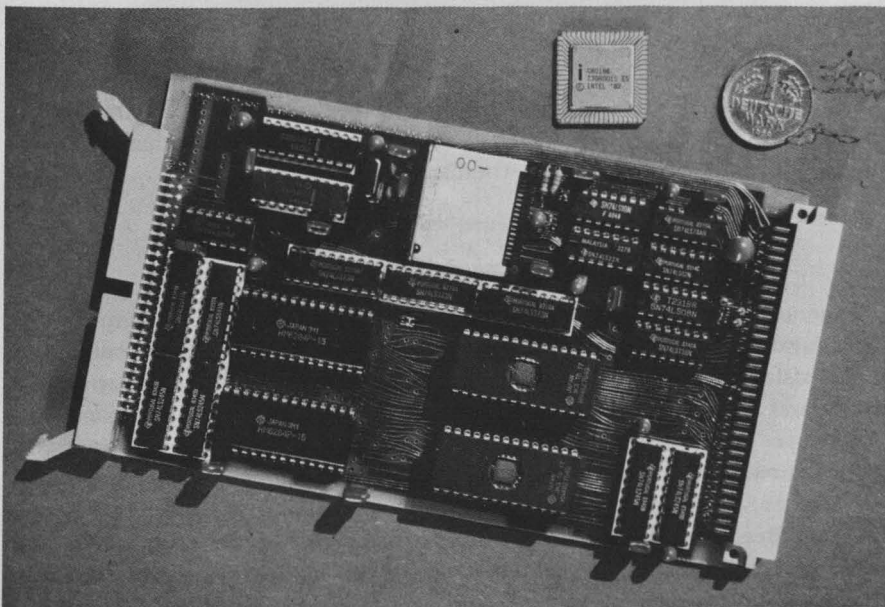


Bild 12:

Mikrorechner (Institut für Regelungstechnik) mit Prozessor INTEL 80186 und 8k Wort-Speicher

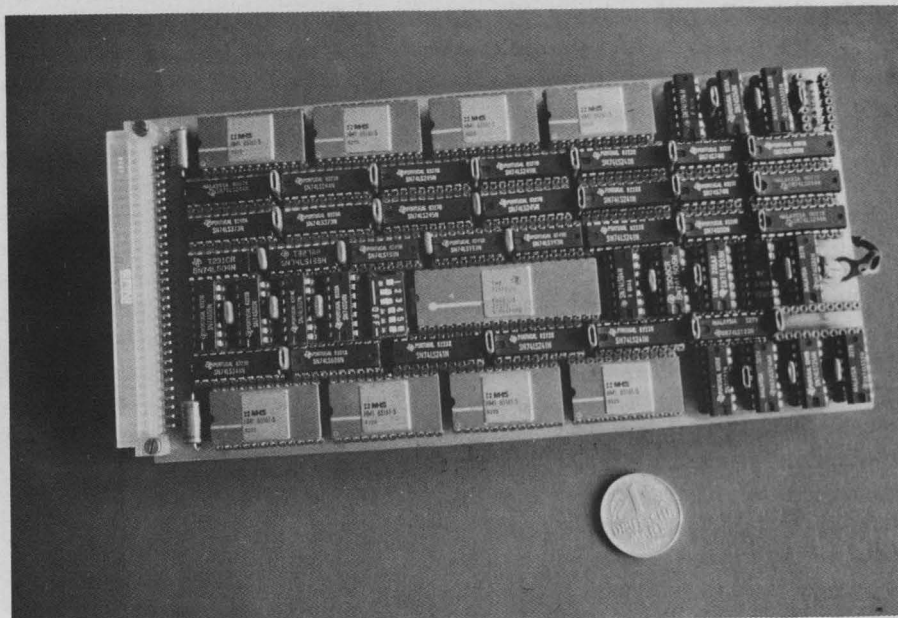


Bild 13:

Mikrorechner (Institut für Regelungstechnik) mit Signalprozessor TMS 320

Multiplikation im Festkommaformat in $0,2 \mu\text{s}$ ausführen, entsprechend 5 Mio. Multiplikationen/sec.

Signalprozessoren für Gleitkomma-Operationen sind inzwischen ebenfalls erhältlich. Damit sind die rechentechnischen Hilfsmittel verfügbar, um Regelungsprobleme nahezu beliebiger Komplexität mit vertretbarem Aufwand zu lösen.

5. Leistungselektronik

Während die Ergebnisse einer Rechnung im Rechenzentrum oder im Büro gewöhnlich als Ausdruck oder in einer graphischen Darstellung am Sichtgerät erscheinen und im Bedarfsfall in Ruhe überprüft werden können, wirkt ein regelungstechnisches Rechengerät unmittelbar auf die Regelstrecke, möglicherweise eine große und wertvolle Anlage. Dabei spielen Sicherheitsaspekte eine bedeutende Rolle, da wegen des kurzen Zeitmaßstabes und der oft unübersichtlichen Zusammenhänge eine manuelle Kontrolle der Signale vor ihrer Weiterleitung nicht möglich ist.

Für die Beeinflussung der zu regelnden Strecke wird Steuerleistung benötigt, die von einem Leistungsverstärker bereitzustellen ist. Es gibt hierfür verschiedene technische Lösungen, z. B. mit hydraulischer, mechanischer oder elektrischer Hilfsenergie. Wegen der einfachen Steuerbarkeit, der kurzen Reaktionszeit und der leichten Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen haben bei ortsfesten Anlagen

elektrische Leistungsverstärker besondere Vorzüge; hier hat sich nach dem Aufkommen der Halbleitertechnik der ruhende Festkörperverstärker mit Silizium-Schaltelementen allgemein durchgesetzt. Wegen der großen Ausgangsleistungen kommt nur ein Schaltbetrieb in Betracht, um die Verluste im elektronischen Schalter klein zu halten. Die elektronischen Leistungs-Schaltelemente bestehen, ebenso wie die integrierten Mikroschaltungen, aus dotiertem Halbleitermaterial, gewöhnlich Silizium; die monokristallinen Scheiben sind ähnlich denen, woraus durch Zerteilen Mikroschaltungen gefertigt werden. Auch die Steuerungsvorgänge im Halbleiter sind ähnlich, obwohl natürlich andere Entwurfskriterien gelten.

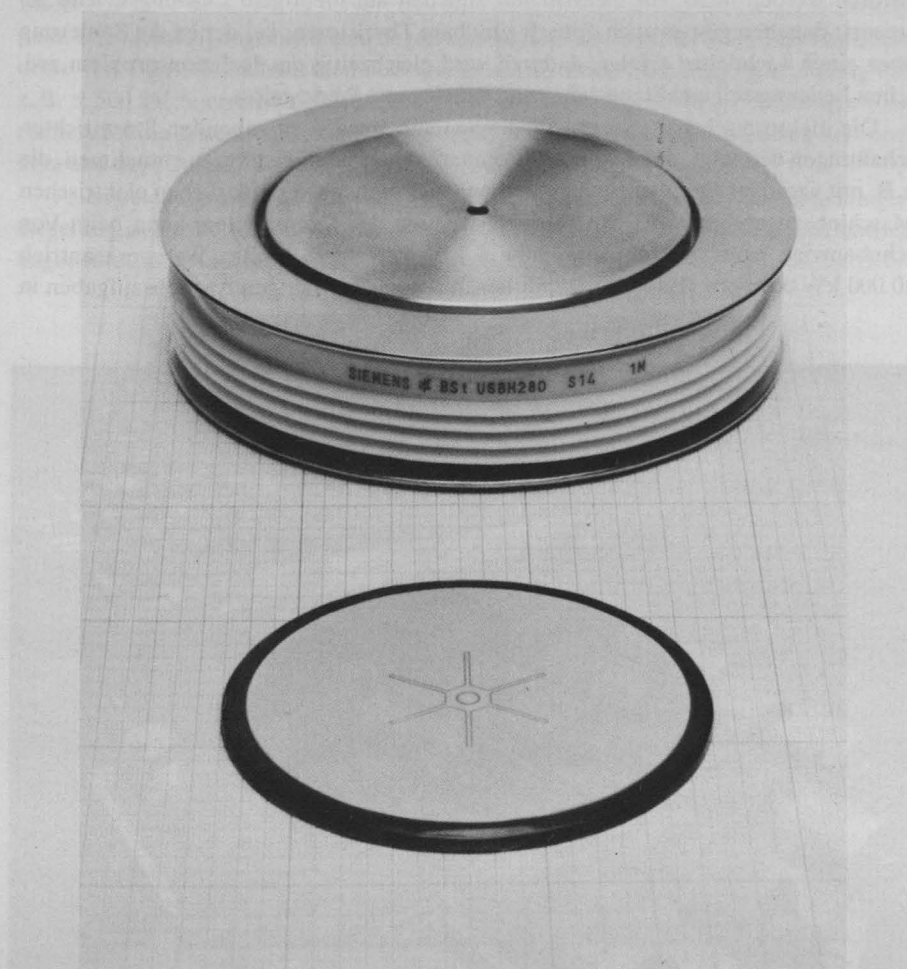


Bild 14:

Hochleistungsthyristor für 4 kV Sperrspannung und 4 kA Durchlaßstrom (Siemens)

Die mit elektronischen Schaltern steuerbaren Leistungen sind beachtlich: Bei Leistungstransistoren liegt die Grenze gegenwärtig bei etwa 1000 V Sperrspannung und einem maximalen Durchlaßstrom von einigen 100 A. Bei den langsamer schaltenden Thyristoren, die sich von Transistoren auch hinsichtlich des Steuerungsverfahrens unterscheiden, liegen die Grenzen etwa bei 5000 V und 5000 A je Element, wobei kurzzeitig eine mehr als 10-fache Stromüberlastung zulässig ist. Die Abmessungen sind nun völlig andere; während bei mikroelektronischen Schaltern die charakteristische Länge im Bereich von μm liegt, verwendet man für große Thyristoren Si-Einkristallscheiben von mehr als 10 cm Durchmesser. Bild 14 zeigt einen fertigen Hochleistungsthyristor und die zugehörige Halbleiterscheibe, d. h. den eigentlichen aktiven Teil. Heutige Thyristoren werden meist mit elektrischen Signalen auf niedrigem Leistungsniveau gesteuert; daneben gibt es auch optisch zündbare Thyristoren, bei denen die Steuerung über einen Lichtleiter erfolgt; dadurch wird gleichzeitig das Isolationsproblem zwischen Leistungsteil und Steuerschaltung auf elegante Weise gelöst.

Die elektronischen Leistungs-Schaltelemente werden zu ruhenden Stromrichterschaltungen vereinigt, um dem Drehstromnetz steuerbare Leistung zu entnehmen, die z. B. mit variabler Frequenz und Spannung einer drehzahlveränderlichen elektrischen Maschine zugeführt wird. Die Ausgangsleistung des Stromrichters kann beim Vorschubantrieb einer Werkzeugmaschine 1 kW, bei einem großen Walzwerksantrieb 10.000 kW betragen (Bild 15). Damit lassen sich die vielfältigen Antriebsaufgaben in

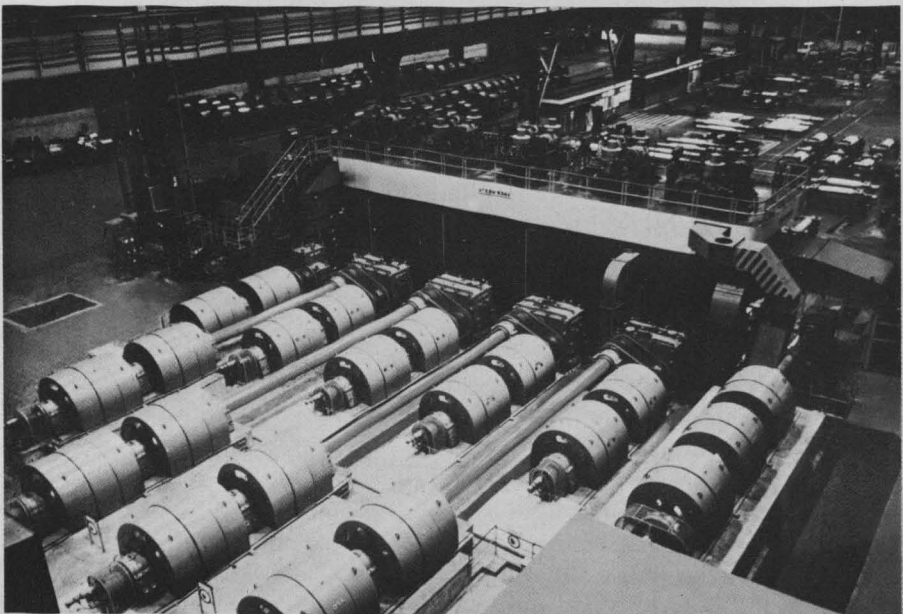


Bild 15:
Kaltwalzwerk mit stromrichtergespeisten Gleichstromantrieben (AEG)

der Industrie und im Transportwesen in wirtschaftlicher und energiesparender Weise erfüllen. Stromrichter gespeiste Antriebe sind immer mit umfangreichen Regeleinrichtungen versehen, die einmal zum Schutz von Stromrichter, Antriebsmaschine und Last dienen, zum anderen notwendig sind, um die je nach Betriebszustand erforderlichen Drehmomente, Beschleunigungen, Drehzahlen oder Drehwinkel definiert vorgeben zu können. Hier liegt ein weites Gebiet, wo Mikroelektronik und Leistungselektronik unmittelbar zusammenwirken.

Die größten mit Stromrichtern gesteuerten elektrischen Leistungen kommen bei der Energieübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom vor, mit der es möglich ist, Energie auf weite Entfernung (>1000 km) ohne Stabilitätsprobleme zu übertragen, Inselnetze über Seekabel zu versorgen oder Netze unterschiedlicher Frequenz zu koppeln. Die Übertragungsleistungen liegen hier im Bereich von 1000 MW; dabei sind hunderte von Thyristorelementen notwendig, um die hohe Übertragungsspannung von z. B. ± 500 kV zu erreichen. Bild 16 zeigt einen Teil des 500 MW-Hochleistungsstromrichters für die erste unmittelbare Kopplung zwischen dem westeuropäischen Verbundnetz und dem Comecon-Netz.

Auch solche großen elektrischen Anlagen können nur mit einer leistungsfähigen Regelung sicher betrieben werden. Dabei genügt es nicht, wie in Bild 1 schematisch angedeutet, eine einzige Regelgröße zu erfassen; vielmehr müssen – je nach Betriebs-

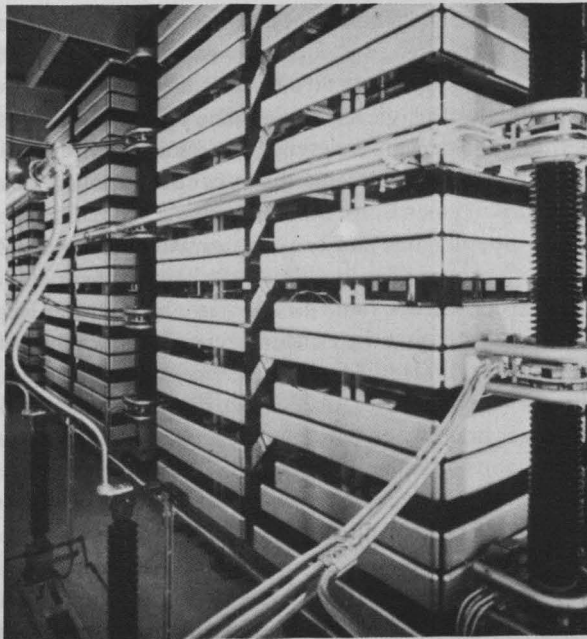


Bild 16:

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, Stromrichter in der Station Dürnrohr
(AEG, BBC, Siemens)

zustand – Ströme, Spannungen, Wirk- und Blindleistungen, Zünd- und Löschwinkel durch eigene Regelkreise geführt werden. Die Komplexität solcher Regelungen ist beträchtlich und ist wiederum am besten mit den Mitteln der Mikroelektronik beherrschbar.

Wegen der schnellen Schaltfolgen der Thyristoren – z. B. 300 Hz bei einem Hochleistungsstromrichter, 3 kHz bis oberhalb der Hörgrenze bei einem Stromrichter kleinerer Leistung – sind gesteuerte Stromrichter Leistungsverstärker und Stellglieder mit hervorragenden dynamischen Eigenschaften, mit dem sich z. B. das Drehmoment eines großen Walzmotors in weniger als 10 ms auf einen vom Drehzahlregler vorgegebenen Wert einstellen läßt. Nur mit Stromrichtern ist es möglich, Leistungen von vielen MW in einem Zeitmaßstab von ms, d. h. fast unverzögert, zu steuern. Hier gibt es weder bei hydraulischen noch mechanischen Leistungsverstärkern vergleichbare Alternativen.

Ausblick

Mikroelektronik und Leistungselektronik haben sich in den letzten Jahren stürmisch entwickelt, wobei einerseits immer dichter gepackte integrierte Schaltungen mit zunehmender Signalverarbeitungsleistung und zum anderen immer größere makroelektronische Komponenten mit praktisch unbegrenzter elektrischer Ausgangsleistung entstanden. Die Regelungstechnik verbindet beide Extreme, um hochwertige Regelsysteme zu bauen, die hinsichtlich Leistung, Dynamik, Genauigkeit und betrieblicher Flexibilität alles hinter sich lassen, was noch vor wenigen Jahren für möglich gehalten wurde. Dies wirkt sich auf allen Gebieten der Technik aus, in der Produktionstechnik wie im Verkehr oder in der Energieversorgung. Die Entwicklung selbsteinstellender, adaptiv-lernender und selbstdiagnostizierender Regelungen wird damit ebenso möglich wie der Entwurf kostengünstiger fehlertoleranter Steuerungen, bei denen ein Teilausfall nicht notwendig zu einer Betriebsunterbrechung führt. Damit sind alle Werkzeuge verfügbar, um die Aufgaben zu lösen, die der Wunsch oder der Zwang zur fortschreitenden Automatisierung in der Produktionstechnik stellt.

Man kann die Mikroelektronik somit als das ideale Medium der Regelungstechnik betrachten; sie ist wegen der praktisch materiefreien Technik umweltfreundlich und stellt ein weites innovatives und intellektuell anspruchsvolles Betätigungsfeld dar. Die Makroelektronik ist eine optimale Ergänzung, um die in der Mikroelektronik gewonnenen Steuersignale zur praktischen Wirkung zu bringen, ähnlich wie dies in der Natur beim Zusammenspiel von Gehirn und Muskel der Fall ist.

Die Entwicklung der Halbleitertechnik im gesamten Leistungsbereich bedeutet eine enorme Erweiterung der technischen Möglichkeiten, sie bringt aber wegen der Auswirkungen, z. B. in der Informations- und Produktionstechnik, bekanntermaßen auch Gefahren mit sich. Wir müssen mit dieser Ambivalenz leben, denn die technische Entwicklung läßt sich in einer offenen Wirtschaft weder verhindern noch ohne Schaden ignorieren. Die Lösung der entstehenden Folgeprobleme ist deshalb nicht ausschließlich im technischen Bereich zu suchen; die Aufgabe richtet sich als Herausforderung an die gesamte Gesellschaft, einschließlich der Sozialpartner, Politiker und Pädagogen.